

Biorremediación de aguas residuales mediante *Eichhornia crassipes* y *Lemma minor*

Alfaro Herrera Dila Patricia¹, Blanco Morales Maryzel Omayra²,
Germy Moreno Claudia Jennifer³, Orozco Alzate Jamy Vanesa⁴, Clara Gutiérrez Castañeda⁵

Resumen

El objetivo de este estudio fue identificar el papel de las macrófitas flotantes en la biorremediación de las aguas residuales. Metodología: revisión bibliográfica. Las especies *Eichhornia crassipes* y *Lemma minor* son las especies más utilizadas en procesos de biorremediación de aguas residuales, entre los principales mecanismos biológicos involucrados en la capacidad de remover nutrientes y metales se encontraron la biosorción y fitovolatilización. Se recomienda bajo condiciones controladas su uso como alternativa para la biorremediación de metales pesados en aguas residuales.

Palabras clave: Biorremediación, macrófitas, metales pesados.

Abstract

The objective of this study was to identify the role of floating macrophytes, in bioremediation of wastewater through literature review. The species *Eichhornia crassipes* and *Lemma minor* are the most used species in bioremediation processes of wastewater, among the main biological mechanisms involved in the ability to remove nutrients and metals are biosorption and phytovolatilization. Its use is recommended under controlled conditions as an alternative for bioremediation of heavy metals in wastewater.

Key Words: Bioremediation, macrophytes, heavy metals.

1-2-3-4 Estudiantes de Microbiología. Universidad Libre Barranquilla. dilaalfaro@yahoo.es, mary_190@hotmail.com , kluhermith@hotmail.com, jamy125@hotmail.com

5 Microbióloga Agrícola y Veterinaria. MSc. profesor Investigador Universidad Libre Barranquilla. clarag.gutierrezc@unilibre.edu.co

Introducción

Garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y saneamiento es un reto de agenda mundial(1). El manejo y disposición de los vertidos producidos por actividades antropogénicas especialmente las relacionadas con el uso del agua con destino para el consumo humano e industrial, que son vertidas frecuentemente a los cuerpos de aguas superficiales, generan la contaminación del recurso hídrico. Por tal razón, el Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales Municipales en Colombia (2004), afirma que debido a la incorrecta recolección, tratamiento y disposición de las descargas generadas por actividades como la agropecuaria, la industrial y las aguas residuales domésticas, se ha generado en el país problemas de sanidad y de calidad del agua en varias regiones. El escenario comienza a ser insostenible, en la medida en que los cuerpos de aguas a donde llegan estos residuos ya se saturan y sobrepasan la capacidad de asimilar por si solos los diferentes contaminantes, lo que nos deja la consecuencia de tener que remediarlos lo que conlleva un gran costo(2).

Las macrófitas flotantes se han propuesto como estrategia para la remediación de aguas residuales, a pesar de ello, existen algunas contradicciones en el uso de las mismas, en este sentido se hace necesario realizar una revisión exhaustiva sobre los principales mecanismos biológicos, las ventajas o desventajas en la utilización de macrófitas para consideraciones posteriores en su implementación en sistemas de biorremediación.

Biorremediación

La biorremediación es una tecnología donde se utiliza el potencial metabólico de organismos especialmente microorganismos y plantas para transformar contaminantes orgánicos y metales, en com-

puestos menos persistentes y estables en el ambiente(3) Los procesos de biorremediación se clasifican en dos métodos: "Ex situ e in situ" en la primera se trata de usar tecnologías como biorreactores, biofiltros y algunos métodos de compostaje los cuales se realizan en el lugar de la contaminación, mientras que en la segunda se incluyen la bioestimulación, sistema de suministro de líquidos y algunos métodos de compostaje que se realizan fuera del lugar de contaminación(5-6).

La fitotecnología es otro método de biorremediación, es considerada como una tecnología rentable y alternativa(7) que utiliza plantas y microorganismos, según el tipo de contaminante las condiciones del lugar pueden ser utilizadas como medio de contención o eliminación de metales(8). La fitotremediación tiene la ventaja de que las plantas llevan a cabo reacciones químicas, utilizando luz solar, ya sea para metabolizar o mineralizar moléculas orgánicas. Las plantas y los microorganismos que se encuentran en la zona adyacente a la raíz de la planta (rizósfera) tienen la habilidad de degradar estos contaminantes o limitar su distribución(9-11).

La utilización de plantas acuáticas se ha implementado como tratamiento para aguas residuales y se ha evidenciado que tienen gran capacidad de remoción de sustancias así como nutrientes o metales pesados(12-13). Estas plantas cumplen un papel importante en los ecosistemas acuáticos, brindan directa o indirectamente alimentos, protección y gran número de hábitats para muchos organismos de estos ecosistemas. Estas plantas pueden ser utilizadas como materia prima en la industria o se utilizan en procesos de biorremediación(14).

Las plantas acuáticas, tienen la capacidad de almacenar y eliminar sustancias tóxi-

cas mediante sus procesos metabólicos, principalmente metales pesados, por lo que son llamadas plantas hiperacumuladoras. Las plantas realizan la captación de los elementos tóxicos como hidrocarburos aromáticos polinucleares, hidrocarburos totales del petróleo, plaguicidas (herbicidas, insecticidas y fungicidas), compuestos clorados, explosivos y surfactantes (detergentes), esto sucede a través de transportadores específicos que están presentes en las raíces con alta capacidad para absorber los diferentes contaminantes(15). En la fitorremediación se identifican diversos tipos de técnicas teniendo en cuenta qué parte de la planta es utilizada o qué microorganismos contribuyen a la degradación de los contaminantes.

- Fitoextracción o fitoacumulación: algunas plantas acumulan contaminantes en sus raíces, tallos o follaje, las cuales pueden ser fácilmente cosechadas, por lo general metales pesados.
- Rizofiltración: las raíces absorben, precipitan y concentran los compuestos contaminantes a partir de líquidos contaminados y los degrada a compuestos orgánicos.
- Fitoestabilización: consiste en reducir la biodisponibilidad de metales y otros contaminantes en el ambiente por medio de mecanismos de secuestración, lignificación o humidificación a través de las raíces de las plantas.
- Fitoestimulación: los exudados radiculares, estimulan el crecimiento de microorganismos degradadores de compuestos contaminantes
- Fitovolatilización: las plantas liberan en la atmósfera por medio de su transpiración los compuestos orgánicos y los contaminantes(16).

Macrófitas

Las macrófitas acuáticas representan alrededor del 1% de la flora vascular, constituyen la forma macroscópica de vegetación acuática, en conjunto con el fitoplancton y perifiton, las macrófitas acuáticas son los productores primarios en sistemas lacustres, son de gran importancia por su alto grado de especificidad, simpleza corporal, uso en alimentación animal, producción de biogás y en la depuración de aguas residuales contaminadas con metales pesados(15).

Las macrófitas flotantes se han descrito como un grupo cosmopolita, su distribución está determinado por diferentes factores tales como topografía, la geología y el clima, además tienen un eficiente mecanismo de propagación debido a su tolerancia ecológica(15). El uso de estas plantas acuáticas en la remoción de metales pesados es un método efectivo, de fácil implementación y particularmente económico con posibilidad de utilización en zonas rurales dispersas(16).

Remoción de metales pesados

La contaminación por metales pesados, es una de las más comunes en los sistemas acuáticos (17). Dependiendo en las concentraciones que se encuentren pueden ser tóxicas para los humanos y para el medio ambiente, algunos de esos metales pueden ser necesarios, otros no pueden ser asimilados por algunos organismos y por ende se convierten en un peligro(18).

Los metales pesados son aquellos elementos químicos que tienen una densidad mayor o igual a 5g/cm³ cuando se encuentran en una forma elemental(19). Estos se forman naturalmente por ciertos procesos meteorización y también llegan a los ecosistemas por la mala manipulación de los desechos industriales, los vertidos de aguas residuales(20).

Las plantas pueden acumular metales, siendo potenciales para fitorremediación las especies tolerantes. La tolerancia es evaluada mediante los coeficientes de translocación y bioacumulación, el primero determina la capacidad de la planta para translocar los metales desde la raíz y hacia el tallo o las hojas sin considerar la concentración de los metales externos a la planta; el coeficiente de bioacumulación mide la capacidad de la planta para acumular metales del medio(21).

Las técnicas de absorción de metales se dan en dos etapas, durante las dos primeras horas de contacto con el agua, ocurre la remoción de la mayor cantidad de metales; la segunda etapa involucra mayor tiempo de adsorción y menor cantidad de extracción(22). Un estudio evaluó la capacidad de remoción de metales por *Eichhornia crassipes*, los resultados mostraron que la máxima adsorción del metal se da en las primeras 24 horas durante el proceso de fitorremediación(23). Una de las más grandiosas ventajas de utilizar la biorremediación es que no genera contaminantes secundarios peligrosos para el ambiente ni para la comunidad (24).

Mecanismo de absorción de metales

Las macrófitas tienen varios mecanismos para llevar a cabo el proceso de depuración del agua, estos son la filtración, la sedimentación de sólidos, la incorporación de nutrientes a la planta y la degradación de materia orgánica por un grupo de microorganismo asociados a las raíces de las plantas(25).

En cuanto a los metales se cree que el mecanismo de acción es la formación de un complejo entre metales y los aminoácidos presentes en la célula de las plantas. Otro mecanismo vincula la interacción microorganismo y raíces de las plantas, a través de la producción de sólidos que flokulran

y luego sedimentan por gravedad(26). Varios de estos metales se convierten en forma volátil y son liberados a la atmósfera por medio de un proceso llamado fitovolatilización(27). Este proceso ha sido utilizado para la extracción de algunos metales pesados como mercurio de aguas contaminadas(28).

La absorción de metales se lleva a cabo por la unión entre la proteínas de transporte intracelular y sitios de unión de alta afinidad median la absorción de metales a través de la membrana plasmática, existen dominios específicos en las proteínas transportadoras, que enlaza y transporta iones metálicos desde el espacio extracelular, varias clases de proteínas han sido implicadas en el transporte de metales pesados en las plantas; como proteínas de la familia de las ATP-ásas, CPX y NRAMP (Natural resistance-associated macrophage protein), estas proteínas están involucradas en la homeostasis de iones metálicos en general y la tolerancia general de las plantas a los metales(29).

Dentro de las macrófitas más utilizadas para procesos de biorremediación de aguas, se encuentra *Eichhornia crassipes*, conocido también como buchón de agua. Esta una planta acuática vascular de flotación libre con raíces sumergibles y fibrosas, es la octava planta con crecimiento más rápido en todo el mundo, lo que le permite extenderse y sobrevivir en muchos ambientes. Esta planta en sus raíces tiene bacterias que actúan en los procesos de nitrificación, desnitrificación y amonificación(15).

Las raíces de estas plantas absorben el metal por un proceso de difusión en el medio y por intercambio de cargas, los metales son transportados por vía apoplástica o simplástica. Estos dos procesos tienen ventajas debido a que no producen con-

taminantes secundarios, es poco perjudicial para el ambiente y se puede reciclar el agua(30).

Estudios realizados con *E. crassipes*, determinaron que la concentración óptima en agua para la absorción de Cadmio (II) y Mercurio (II) es de 5mg/L a pH 5,0 siendo los porcentajes de absorción de 16.56% y 15,60% respectivamente a los siete días de ensayo(31). Otros estudios determinaron porcentajes de remoción de níquel del 100% y 93% a concentraciones de 1,3 y 6 mg/l(32). En condiciones de pH neutro y exposición de 90mg/L de Cr *E. crassipes* acumuló cantidades significativas de Cr (67.3 mg Cr/g) en su biomasa(33). Los resultados mencionados indican que esta especie es promisoria para la remoción de metales de los cuerpos de agua.

Lemma minor cuyo nombre común es lenteja de agua, es una macrófita acuática, su cuerpo es en forma de taloide, estructura plana y verde con una sola raíz delgada que realiza la recolección de los nutrientes del medio acuático. Su tamaño es pequeño, va desde 2 a 4 mm de longitud, con 2 mm de ancho esta planta se desarrolla en temperaturas que oscilan entre 5° C a 30° C (34-38). Las condiciones óptimas para su crecimiento son aguas calmadas, ricas en ortofosfato, nitrógeno con un rango de pH entre 4,5 a 7,5(39-42).

La lenteja de agua es capaz de adaptarse a cualquier condición lumínica y cumple con las características para ser utilizada en tratamientos de agua residual por su gran capacidad de remover metales pesados (37,39-44).

Lemma minor, tiene la capacidad de remover níquel, Rizzo & Rossa (2012) evaluaron la capacidad de remoción de níquel en concentraciones de 0,1, 3 y 6 mg/l alcanzando porcentajes de remoción del

100%, 100% y 85% respectivamente(45). La máxima remoción fue en las primeras 24 horas en las menores concentraciones. En otros estudios *L. minor* fue expuesta a 2.5 y 5.0 mg /l, bajo estas condiciones se eliminó el 82% de níquel en la solución(46). Esta a su vez tiene la capacidad de disminuir la concentración de cromo hexavalente y cromo total en agua residuales pasando de concentraciones de 4.089 mg/L a 0.038 mg/L en 24 horas(47).

Conclusión

La macrófitas tiene gran capacidad de biorremediación de aguas contaminadas con metales pesados como el cromo, cadmio, níquel y el mercurio entre otros contaminantes. El uso de macrófitas para la remediación de aguas residuales es una buena alternativa para obtener y potenciar los mecanismos de depuración de los metales presentes en el agua.

Referencias Bibliográficas

1. Agua y saneamiento Desarrollo Sostenible. [Internet]. Available from: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
2. Uribe Botero B. Intervencion Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2011 Jul 1;35:52
3. Schmidt DW. Suelos contaminados con hidrocarburos: la biorremediación como una solución ecológicamente compatible.
4. Frazar C. The bioremediation and phytoremediation of pesticide-contaminated sites. Natl Netw Environ Stud. 2000. <http://www.oxfordreference.com/view/10.1093/acref/9780199661350.001.0001/acref-9780199661350-e-4512>
5. Benavides López De Mesa, J., Quintero, G., Guevara Vizcaíno, A., James Cáceres, D., Gutiérrez Riaño, S. and Miranda García, J. (2006).

- Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. *Nova*, [online] (4 (5), p.4. Available at: <http://www.redalyc.org/pdf/411/41140509.pdf> [Accessed 4 Oct. 2019].
6. Maroto Arroyo, María Esther., Rogel Quesada, Juan Manuel. Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas por hidrocarburos.
7. Robinson, Rainer Schulin, Bernd Nowack, Stéphanie Roulier, Manoj Menon, Brent Clothier, et al. (2006). Phytoremediation for the management of metal flux in contaminated sites. *For. Snow Landsc. Res.* 80, 2: 221–234
8. Ciencias IDE, Ingeniería BE, Hydrocotyle D. Área Académica de Química Tecocomulco , Hidalgo ; identificación de compuestos Director de tesis. 2012.
9. Idalgo JOSÉCEH, Unod JUJ, Arco MOYM, Strada SAE. Recent Applications of Waste Water By Means. *Theoria* [Internet]. 2005;14(1):17–25. Available from: <http://www.ubio-bio.cl/theoria/v/v14/a2.pdf>
10. Zevallos T, Belén D, Cecilia M, Martín L. Evaluación de macrófitas autóctonas de flotación libre para su empleo en el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados. 2016;14(14).
11. Olguín EJ, Hernández ME, Sánchez-Galván G. Contaminacion de manglares por hidrocarburos y estrategias de biorremediacion, fito-remediacion y restauracion. *Rev Int Contam Ambient.* 2007;23(3):13954.
12. Bisht S, Pandey P, Bhargava B, Sharma S, Kumar V, Krishan D. Bio-remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using rhizosphere technology. *Brazilian J Microbiol.* 2015;46(1):7–21.
13. Núñez L, Meas V, Ortega B, Olguín J. Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Ciencia Rev la Acad Mex ... [Internet].* 2004;69–83. Available from: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Fitorremediación:+fundamentos+y+aplicaciones#0>
14. Jeannette Marrero-Coto, Isis Amores-Sánchez OC-P. la Fitorremediacion, una tecnologia que involucra a plantas y microorganismos en el saneamiento ambiental. 2012; Available from: Jeannette Marrero-Coto1,
15. Martelo J, Lara Borrero JA. Macrofitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revision del estado del arte. *Ingenieria y Ciencia* 2012 Jan 1;8(15):221-243.
16. Arias Martínez SA, Betancur Toro FM, Gómez Rojas G, Salazar Giraldo JP, Hernández Ángel ML. Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Inf Técnico.* 2010;74:12–22.
17. González, E, Marrugo, J, Martínez, V. El problema de Contaminación por Mercurio. Nanotecnología: Retos y Posibilidades para Medición y Remediación. Red Colombiana de Nanociencia y Nanotecnología
18. Navarro-Aviñó JP, Aguilar Alonso I, López-Moya JR. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas.* 2007;16(2):10–25.
19. Eróstegui Revilla CP. Contaminación por metales pesados. *Rev Científica Cienc Médica.* 2009;12(1):45–6.
20. Marrugo Negrete JL. Evaluación de la Contaminación por metales pesados en la Ciénaga de la Soledad y Bahía de Cispatá, Cuenca del Bajo Sinú, Departamento de Córdoba. Grup Investig en Aguas, Química Apl

- y Ambient - GAQAA. 2011;153.
21. Baker, A. J. M., and J. M. Brooks. 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements – a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery* 1: 811–826.
22. Jerez Chaverri JA. Remoción de metales pesados en lixívidos mediante fitorremediación. 2013;104.
23. Mejía JC, Uam-xochimilco A De. Manejo Integral de la Cuenca de Xochimilco y Sus Afluentes. :56.
24. Hernández-Perez A, labb JI. Microalgas, cultivo y beneficios. *Rev Biol Mar Oceanogr*. 2014;49(2):157–73.
25. Hidalgo JC, Montano JJ, Sandoval M. Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *Theoria* [Internet]. 2005;14(1):17–25. Available from: <http://www.ubiobio.cl/theoria/v/v14/a2.pdf>
26. Alvarado L. Aplicación tecnologica de las macrofitas a la depuracion de aguas residuales con la ayuda de microorganismos. 2006;70.
27. German H. Phytoextraction of heavy metals from contaminated soil : expectations and limitations. 2005;7.
28. Dixit R, Wasiullah, Malaviya D, Pandiyan K, Singh UB, Sahu A, et al. Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: An overview of principles and criteria of fundamental processes. *Sustain*. 2015;7(2):2189–212.
29. Muhammad Bilal Shakoor, Shafaqat Ali, Mujahid Farid, Muhammad Ahsan Farooq, Hafiz Muhammad Tauqueer, Usman Iftikhar, Fakhir Hannan SAB. Heavy metal pollution, a global problem and its remediation by chemically enhanced phytoremediation: A Review. *J Biodive Environ* ... [Internet]. 2013;3(3):12–20. Available from: <http://www.innspub.net/> wp-content/uploads/2013/03/JBES-V3No3-p12-20.pdf
30. Revathi S, Venugopal S. Physiological and biochemical mechanisms of heavy metal tolerance. *Int J Environ Sci*. 2013;3(5):1339–54.
31. Raúl V, Llantoy P, Negrón ACV. estudio de los parámetros fisicoquímicos para la fitorremediación de cadmio (ii) y mercurio (ii) con la especie *eichhornia crassipes* (jacinto de agua). *Rev Soc Química Perú*. 2014;80(ii):164–73.
32. Rizzo P, Rossa LA. *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes* para eliminar el níquel. 2012;153–7.
33. Ricardo Benítez, victor calero, enrique, peña jaime martin. evaluacion de la cinética de acumulacion de cromo en el buchon de agua. 2011;5202.
34. Sierra Cuello L, Ramírez Hernández L, Rodríguez Miranda J. Determinación de la tasa relativa de crecimiento de la *Lemna minor* sp en el tratamiento de efluentes de un sistema de 1 tratamiento de aguas residuales municipales. *I+D Revista de Investigaciones* [Internet]. 2016 [cited 4 October 2019];(Volumen 7 Número 1 Año 04):91-97. Available from: <http://www.udi.edu.co/revista-investigaciones/index.php/ID/article/view/68>
35. Pinto P, Lozano G. Flora de colombia. *Flora* [Internet]. 1995;61(7):138. Available from: <http://gaz.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0016549299061005002>
36. Jaramillo Jumbo MDS, Flores Campoverde ED. Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales *Lemna minor* (Lenteja de agua) y *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera. *Univ Politécnica Salesiana* [Internet]. 2012;128.

- Available from: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/2939>.
37. Zetina Cordoba, P. Reta Mendiola, J.L, Ortega Cerrilla M.E, Ortega Jiménez E. , Sánchez-Torres M.T.E. , Herrera Haro, J.G. , Becerril Herrera M. Utilización De La Lenteja Agua (Lemnaceae) En La Producción De Tilapia (Oreochromis Spp.). Arch Zootec. 2010;59:133–55.
38. Khellaf N, Zerdaoui M, Faure O, Claude J. Tolerance to Heavy metals in the duckweed *Lemna minor*. 2002;2–5.
39. Arias A, Ramirez A, Fernandez V, Sanchez NE. The use of Common Duckweed (*Lemna minor*) in the treatment of wastewater from the washing of sisal fiber (*Furcraea bedinghausii*). [Internet]. 2016;18(2):25–34. Available from: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=116744582&lang=es&site=ehost-live>
40. Ricardo Benitez, Victor Calero, Enrique, Peña Jaime Martin. Evaluacion de la cinética de acumulacion de cromo en el buchon de agua. 2011;5202.
41. Mironga JM. The effect of water Hyacinth, *Eichhornia crassipes*, infestation on phytoplankton productivity in Lake Naivasha and the status of control. 2003;573–9.
42. Axtell NR, Sternberg SP, Clausen K. Lead and nickel removal using Microspora and *Lemna minor*. Bioresource Technology. 2003 Jan 1;89(1):41-48. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00034-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00034-8)
43. Adolfo D. Arenas L-MM y GT. Evaluation of the plant *Lemna minor* for the bioremediation of water. 2011;2(3):1–11
44. El agua como elemento de vida y calidad. IV Congreso Internacional de Ciencias, Artes, Tecnologías y Humanidades [Internet]. México DF: María Del Carmen Durán de Bazua, Javier Jimenez Espriu; 2011 [cited 4 October 2019]. p. 2. Available from: http://www.economia.unam.mx/miguelc/docs/pubs/libro_eleccciontemporalagua.pdf
45. Rizzo, P., & Rossa, L. A. (2012). minor y *Eichhornia crassipes* para eliminar el níquel, 153–157
46. Fallis A. Evaluación de un sistema de biorremediación de aguas residuales porcicolas en la finca el porvenir, verde Suncunchoque, sector la Laja, Ubaté-Cundinamarca, y su reutilización con fines agroambientales. J Chem Inf Model. 2013;53(9):1689–99.
47. Méndez P, Ramírez G, César A, Guatiérrez R, Alma D, García P. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. 2009.